DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151135

焉耆盆地气候变化和人类活动对生态系统服务价值的影响研究*

哈丽旦·司地克 玉素甫江·如素力** 麦麦提吐尔逊·艾则孜

(新疆师范大学地理科学与旅游学院/新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室 乌鲁木齐 830054)

摘 要 环境变化下的生态服务功能研究，对生态环境与社会经济持续发展具有重要的科学意义和应用价值。本文以新疆焉耆盆地作为研究对象，基于 Landsat 遥感影像数据、DEM 数据和气象要素数据，运用非参数气候变化突变点检验(MK, Mann-Kendall-Sneyers test)、趋势分析方法(Mann-Kendall, MK)，通过计算生态服务价值(ESV)和土地利用/覆盖变化(LUCC)动态度，对新疆焉耆盆地近 40 a (1973—2014 年)生态服务功能的变化及其驱动因素进行了分析。结果显示：1)生态系统服务价值和功能的变化是气候变化和人类活动共同作用的结果；2)山区冰川面积的缩小是山区生态服务价值减少的主要原因；3)平原区的生态系统服务价值以 2004 年为转折点呈现先减少后增加的趋势，整个研究区的生态服务价值分别为 1973 年 85.86×10^8 元、1977 年 94.46×10^8 元、1994 年 84.15×10^8 元、2004 年 89.40×10^8 元和 2014 年 96.47×10^8 元，这与降水量和蒸发量变化趋势吻合。人类活动如长期开垦、扩大绿洲面积和有益的气候变化支撑(降水量增加、蒸发量减少)是平原区生态服务价值增加的主要原因。在山区，生态服务价值随着降水量、蒸发量的变化而变化，在绿洲区生态服务价值的变化是人类开荒耕地、还林、还耕，以及人工栽培芦苇等活动和气候变暖共同作用的结果。

关键词 气候变化 人类活动 生态系统服务价值 焉耆盆地
中图分类号: F301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0684-11

The impact of human activity and climate change on ecosystem services value in the Yanqi Basin, Xinjiang, China*

Halida SIDIK, Yusufujiang RUSULI**, Mamattursun EZIZ

(Institute of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University / Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zones, Urumqi 830054, China)

Abstract Ecosystem goods and services refer to the dependence of economic wealth and human well-being on natural systems. It is common sense that the structures and functions of ecosystems are changing due to climate change and human activity. There is a heated research on the variations in Ecosystem Services Values (ESV) under intensified global change both in time and space. It is a priority issue to determine, at various spatiotemporal scales, the sensitivity of ecosystems to climate change and anthropogenic pressure in arid areas. To better understand the effect of climate change and human activity on ecosystem services, we evaluated the changes in ecosystem services values from 1973 to 2014 in Yanqi Basin, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China. The evaluation methods used included the Mann-Kendall (MK), Mann-Kendall-Sneyers

* 国家自然科学基金项目(41461006, 41161007)、新疆师范大学研究生科技创新项目(XSY201502003)、新疆师范大学地理科学与旅游学院博士点支撑学科开放课题基金项目(XJNU-DL-201403)和新疆维吾尔自治区重点实验室专项资金项目(2014KL016)资助
** 通讯作者: 玉素甫江·如素力，主要从事流域水文与生态系统、3S 技术及应用研究。E-mail: yusupjan@xjnu.edu.cn
哈丽旦·司地克，研究方向为干旱区资源开发与灾害防治研究。E-mail: halidasidik@126.com
收稿日期: 2015−10−21 接受日期: 2016−01−05

* The study was supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 41461006, 41161007), the Science & Technology Innovation Project of Xinjiang Normal University for the Master Students (No. XSY201502003), the Doctoral Station Pillar Program of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University (No. XJNU-DL-201403), and the Special Fund of the Key Laboratory of Xinjiang Uyghur Autonomous Region (No. 2014KL016).
** Corresponding author, E-mail: yusupjan@xjnu.edu.cn
Received Oct. 21, 2015; accepted Jan. 5, 2016

test, ESV and dynamic land use/cover change (LUCC) degree. The ecosystem services value evaluated included gas regulation, climate regulation, water conservation, soil formation, waste disposal, biodiversity protection, food production, raw materials, recreation and leisure. Landsat images, digital elevation model (DEM) and metrological data were used to evaluate ESV and the related changes. Based on the degree of the effects of climate change and human activity, the research area was divided into two parts — the mountain area (mainly affected by climate change) and the plain oasis area (mainly affected by human activity) at a contour of 1 400 m above sea level. According to the type and effect, land cover was classified as water, wetland, plain desert, cultivated land, glacier, warm shrub grassland, cold meadow steppe and highland vegetation. We analyzed the relationship among the variations in ESV, precipitation and evaporation and then quantitatively differentiated the effect of climate change and human activity on ESV. The results showed that: 1) the MK-Sneyers test detected distinct points of change in precipitation and evaporation in mountain area and plain oasis in Yanqi Basin. Precipitation increased and evaporation decreased in mountain area and plain oasis in the same way. Conversion matrix analysis of LUCC detected expansion of agricultural areas to provide food for the increasing population and socio-economic development in the oasis areas. Thus variations in ESV were caused jointly by climate change and human activity. 2) The declining trend in ESV in mountain area was mainly due to the shrinking of glacier areas. 3) ESV decreased initially and increased afterwards with 2004 as the turning point, following the increasing trend in precipitation and evaporation. The calculated total ESV was 85.86×10^8 Yuan in 1973, 94.46×10^8 Yuan in 1977, 84.15×10^8 Yuan in 1994, 89.40×10^8 Yuan in 2004 and 96.47×10^8 Yuan in 2014, respectively. The combined effects of climate change and human activity were main causes of ESV variations in the past 40 years in Yanqi Basin. The main reasons for the increasing ESV in the plain oasis included enlargement of artificial oasis due to intensified human activity and supporting favorable climate change such as increasing precipitation and decreasing evaporation.
Keywords Climate change; Human activity; Ecosystem services values; Yanqi Basin

伴随着社会经济发展步伐加快和气候变暖，人口、资源与生态环境之间的矛盾日益突出。寻求环境变化下的资源环境与社会经济发展之间的平衡问题已成为各国(地区)政府和学者所关注的问题。研究气候变化、人类活动和生态系统服务价值变化是评价环境演变的重要部分，同时它们之间也存在着互相影响和制约的错综复杂关系。在人类活动和气候变化引起的环境变化过程中，土地利用/覆盖变化(LUCC)是人与自然交叉最为密切的环节，土地利用/覆盖的变化以及由此导致的景观生态的变化影响着生态系统的结构和功能[1]，从而导致了生态系统服务价值(ESV)和功能的变化。因此，生态系统服务价值与气候变化和土地利用/覆盖变化结合研究，对于了解区域生态环境变化及其趋势、维持生态平衡、促进区域环境与经济的协调发展具有重要意义[2–3]。

在不同地理环境下生态服务价值、功能对气候变化和人类活动的响应不同。2000 年气候变化专门委员会(IPCC)报告表明，近百年来，全球气候与环境发生了重大变化，其中过去 50 a 的变化更为明显[4]，20 世纪 50 年代以来气候变暖的一半以上是人类活动造成的[5]。不同区域降水、蒸发和辐射能量等气候因素对不同景观类型的驱动作用也不相同[6]。在我国西北干旱与半干旱地区，陆地生态系统的变化往往受多种要素综合作用和影响[7]，其中，生态系统服务功能对降水和蒸发及其收支平衡决定的水分条件非常敏感。同时，人口的不断增加及社会经济的快速发展，加快了人类大规模水土开发活动的步伐，自然植被区转为农作区，长年覆盖的土地变为季节覆盖的耕地[8]。一些研究还表明土地利用/覆被变化大都是人类的社会经济活动所造成的[9–10]，就是说人类社会经济发展造成了土地利用/覆被类型的变化，从而导致了生态系统服务价值和功能的变化。

我国西北干旱区关于生态服务价值已有很多研究，但与气候变化相联系的研究寥寥无几，特别是位于我国西北干旱区天山中段山间的焉耆盆地及其周围地区气候变化和人类活动对生态服务价值影响的研究不多。从不同时空尺度上研究气候变化、人类活动与生态服务价值的相关性将成为今后焉耆盆地经济、政治、生态等一系列可持续发展问题研究的重点。本研究认为：虽然前人的研究描述了环境变化与土地利用类型的变化主要受人类活动的影响，但是在气候变暖的情况下这些研究只考虑人类活动的影响，而少有提到气候变暖的影响，况且只研究了人类主要集中的地区，对山区生态服务价值的研究较少；且对其他地区的研究结果与方法是否适合干旱、半干旱地区的实际情况还不能确定。本研究以我国西北干旱区气候变化明显[11]、地形地貌条件复杂[12]、人类生产活动对生态服务价值的影响显著[13–14]的新疆焉耆盆地及其周围环境为研究区，探索人类活动和气候变化对生态服务价值的影响，对正确辨识变化环境下干旱区生态环境的响应和区域社会经济发展规划等具有重要的理论意义和实用价值。

1 研究区概况

焉耆盆地地处 85°6′~87°36′E, 41°33′~42°42′N, 地理位置上位于天山主脉的依连哈比尔尕山、霍拉山、中间的蒙尔宾山和南部的库鲁克塔格山之间的山间盆地。在行政区划上包括新疆巴音郭楞蒙古自治州的和硕县、焉耆县、博湖县、和静县等。本研究以焉耆盆地及其周围山脉分布的 Landsat 遥感影像 WRS2-Path143/Row31 条带区为主, 适当考虑盆地分水岭界线, 由于遥感数据的时空局限性剪掉研究区东南的小部分, 划分了研究区的空间范围(图 1)。整个研究区总面积为 14 504.53 km^2, 地势西高东低、北高南低, 总体表现为四周向盆地倾斜的地貌形态, 具有明显环绕盆地的"立体气候"特征。根据人类活动的强度及自然地理条件, 焉耆盆地可分为人类活动对自然环境扰动最强的绿洲平原区(海拔高度低于 1 400 m 等高线的区域, 面积为 9 018.46 km^2)和气候变化对环境演变的影响为主的山区(海拔高度高于 1 400 m 等高线的区域, 面积约为 5486 km^2)[15]。研究区地处干旱与半干旱地带, 气候属于暖温带大陆性干旱气候, 热量与光照丰富, 山区和绿洲平原区多年的平均气温分别为−4.84 ℃和 8.6 ℃, 蒸发量分别为 1 408.23 mm 和 1 973.65 mm, 降水量分别为 200.25 mm 和 76.27 mm。20 世纪 50 年以来, 尤其是 70 年代后绿洲区农业耕地面积处于增长趋势, 焉耆盆地已成为在我国受人类活动影响明显的区域。

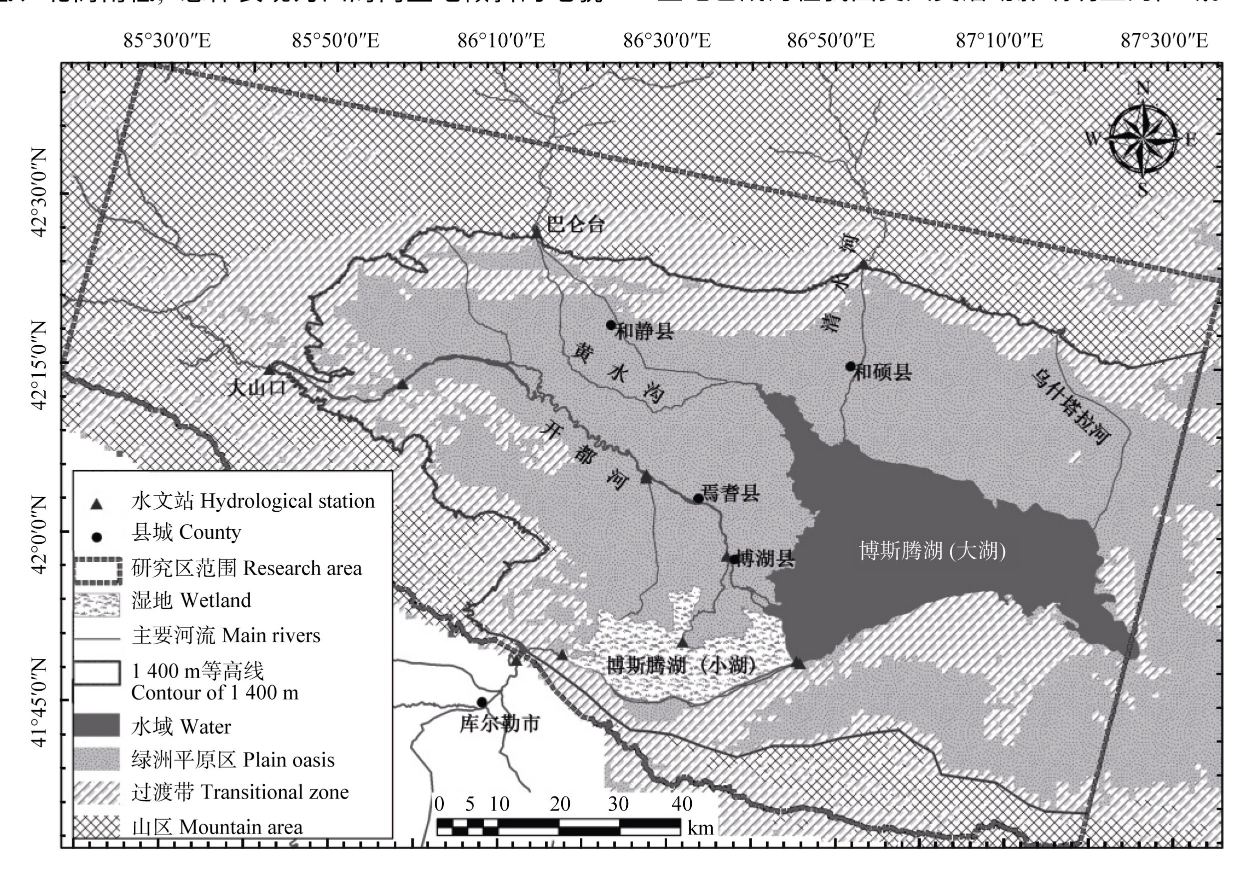


图 1 研究区地理及分区示意图

Fig. 1 Location and regionalization of the research area of the Yanqi Basin

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文采用美国地质调查局 USGS (http://earthexplorer.usgs.gov/)提供的 1973—2014 年的 Landsat MSS、TM、ETM+遥感数据和美国国家航空航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)合作完成的先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型 ASTER GDEM V2.0(分辨率为 30 m)数据, 此外还包括 2014 年 10 月在研究区通过野外考察采集的大量控制点数据和各种地物的定位采样数据。对 Landsat 遥感影像进行几何校正、格式转换、大气纠正、直方图式图像镶嵌、图像裁剪等预处理。DEM 和控制点相结合确定海拔高度 1 400 m 为山区及平原区的边界线。

2.2 研究方法

2.2.1 气候变化突变点检测与趋势分析方法

采用非参数 Mann-Kendall(MK)趋势检验分析法[16−17]对山区和平原区降水、蒸发年平均数据的变化趋势, 对存在突变点的时间序列数据采用非参数 MK

Sneyers 突变检验[18]对突变点进行信度检验，从而验证突变点的真伪，确定本研究需要的遥感数据时期，并用 ENVI 5.1 软件获取焉耆盆地及周围山区的土地利用/土地覆盖变化。

2.2.2　土地利用动态数据获取

根据中国国家标准化管理委员会于 2007 年 8 月发布的《土地利用现状分类》[19]和 FAO/UNEP 土地分类系统，适当考虑研究区土地利用/覆盖特征，在实地考察和验证的基础上，研究区的土地利用/土地覆盖划分为：耕地、高寒草甸草原(海拔高度 1 400 m 以上的植被)、暖性灌草丛类(在自然条件下形成和成长的植被，其作用主要体现在生态方面)、湿地、水域(湖泊、河流、池塘、水库等)、冰川积雪、荒漠等 7 种类型。在以上土地利用/土地覆盖类型体系的基础上，结合实地考察获取的采样点数据对预处理的 Landsat 影像数据进行解译分类和精度评价。精度评价表明，5 期遥感图像分类的平均总精度都大于 89.60%(kappa 系数大于 0.84)，其中部分年份的分类结果如图 2 所示。接着，利用 1973—2014 年的 5 期分类的遥感影像结果图进行景观类型的转移分析。

2.2.3　土地利用变化趋势与生态系统服务价值的计算

土地利用动态度是反映某一土地利用类型数量的变化速度，它既可以表达单一土地类型的时空变化,也可以对区域土地利用动态的总体状况及其区域分异进行分析[20]。单一土地利用类型动态度能够表达某一区域在一定时间范围内某种土地利用类型数量的变化情况，其表达式为：

$$L=\frac{\Delta U_{进}-\Delta U_{出}}{U_{初}}\times\frac{1}{N}\times 100\% \quad (1)$$

式中：$U_{出}$ 为研究时段 N 内某一土地利用/覆盖类型转变为其他类型的面积之和；$U_{进}$ 为其他类型转变为该类型的面积之和；$U_{初}$ 为研究初期某一土地利用/覆盖类型的面积；N 为研究时段。当 N 设定为年时，L 为研究时段内某一土地利用/覆盖类型的年变化。L 仅反映了某一土地利用/覆盖类型面积的年变化，没有反映土地利用/覆盖类型的空间变化[21]，因此，可用以下模型表示某一土地利用/覆盖类型的空间变化的动态度 K，即：

$$K=\frac{\Delta U_{进}+\Delta U_{出}}{U_{初}}\times\frac{1}{N}\times 100\% \quad (2)$$

式中：$U_{出}$、$U_{进}$、$U_{初}$ 和 N 表示的含义同式(1)。

众多学者已关注并开展了不同尺度以及单个生态系统和生态系统单项服务的价值评估研究。1997 年 Costanza 等[22]的研究成果使生态系统服务价值评估的原理与方法从科学意义上得以明确。谢高地等[23]根据中国的实际情况，参考 Costanza 等[22]的研究成果得到中国陆地生态系统单位面积生态服务价值。本研究借用敏感性指数(coefficient of sensitivity, C_S)确定生态服务价值随时间和价值指数变化的依赖程度。将各类土地利用类型的价值指数分别调整 50%，来衡量总生态系统服务价值的变化。调整后的生态服务价值系数对研究区 1973 年、1977 年、1994 年、2004 年、2014 年的生态系统服务总价值及其敏感性指数(C_S)进行了估算；$C_S>1$ 表明生态服务价值相对于 C_S 有弹性，相反对于 C_S 缺乏弹性；敏感性指数计算公式如下：

$$C_S=\frac{(\mathrm{ESV}_m-\mathrm{ESV}_n)/\mathrm{ESV}_n}{(V_{cm}-V_{cn})/V_{cn}} \quad (3)$$

式中：C_S 为敏感度，ESV 为总生态服务价值量，V_c 为价值系数，m、n 分别为生态服务功能价值指数调整后的和初始的生态服务价值，c 为各土地利用类型。根据这些得到焉耆盆地生态系统单位面积服务的价值当量因子表[23](表 1)。

表 1　中国不同陆地生态系统单位面积服务的价值当量因子表

Table 1　Equivalent factors of Chinese ecosystem service values of different ecosystem types　　Yuan·hm^{-2}

生态服务功能 Ecological service function	水域 Water	湿地 Wetland	荒漠 Desert	耕地 Field	冰川 Glacier	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	高寒草甸草原 Cold meadow steppe
气体调节 Gas regulation	0	1 592.7	0	442.4	0	3.1	11.0
气候调节 Climate regulation	407	15 130.9	0	787.5	0	3.5	12.4
水源涵养 Water conservation	18 033.2	13 715.2	26.5	530.9	1.7	3.1	11.0
土壤形成 Soil formation	8.8	1 513.1	17.7	1 291.9	1.2	7.5	26.8
废物处理 Waste disposal	16 086.6	16 086.6	8.8	1 451.2	0.6	5.1	18.0
生物多样性保护 Biological diversity protection	2 203.3	2 212.2	300.8	628.2	19.7	4.2	15.0
食物生产 Food production	88.5	265.2	8.8	884.9	0.6	1.2	4.1
原材料 Raw materials	8.8	61.9	0	88.5	0.0	0.2	0.7
娱乐休闲 Recreation and leisure	3 840.2	4 910.9	8.8	8.8	0.6	0.2	0.6

3 结果与分析

3.1 气候变化特征分析

如图 2 所示，研究区山区和绿洲平原区降水量上升趋势达到显著性水平，Z 值分别为 3.0 和 3.2 ($P<0.01$)。近 40 a 来，焉耆盆地山区和平原区年均降水变化呈增加趋势，并且达显著水平；MK-Sneyers 突变检验结果也显示，焉耆盆地 1970 年以来降水有了明显突变点。

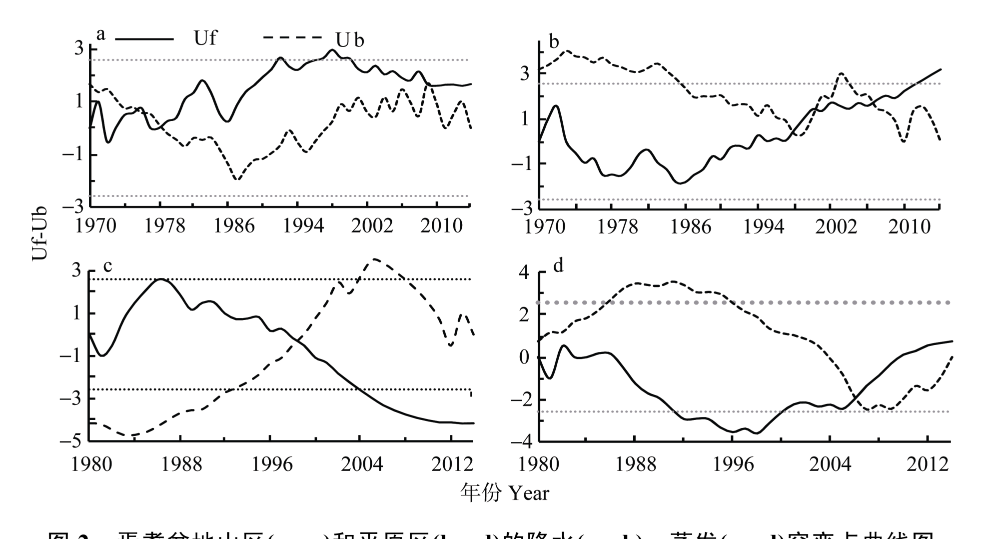


图 2 焉耆盆地山区(a、c)和平原区(b、d)的降水(a、b)、蒸发(c、d)突变点曲线图

Fig. 2 Graphs of MK-Sneyers trend tests and change points of precipitation (a, b), evaporation (c, d) for mountain (a, c) and plain (b, d) areas of the Yanqi Basin

蒸发量 MK 趋势检验结果表明，焉耆盆地蒸发 1980—2014 年期间在山区、平原区呈减少趋势，Z 值分别为–4.2、–3.60，显著性水平都达到 99%。MK 趋势检验结果表明，近 30 a 来焉耆盆地年均山区蒸发变化呈减少趋势，但在平原区 1998 年之前处于减少趋势，1998 年之后稍增加趋势，平原区蒸发量的总体变化呈波动性减少趋势。

3.2 土地利用类型转移分析

根据以上的 MK 突变点分析获得的时间段，分别选用了 1973 年、1977 年、1994 年、2004 年和 2014 年的 Landsat 遥感影像进行解译(图 3)和景观类型的转移(表 2 和表 3)分析。

从表 2 平原区的转移矩阵可以看出：20 世纪 70 年代初和 2000 年前后的博斯腾湖高水位时期湿地转变为水域，其他时期水域转变为湿地；1977—2014 期间湿地一直保持转变为耕地的状态，这是因为在此期间人类大量开垦的原因；整个研究期间由于降水量增加、蒸发量减少，导致土壤含水量增加，荒漠向暖性灌草丛类转变；同时，特别是由于研究区长期的开荒耕地，大量暖性灌草丛类变为耕地。

从表 3 山区的转移矩阵可看出：整个研究期间冰川变为高寒草甸草原；冰川面积的减少趋势与天山冰川面积变化趋势[24–25]基本吻合；荒漠的变化不明显。总之，在研究期间平原区人口明显增加以及随之大量开垦等人为活动导致耕地面积快速增加，耕地面积向盆地四周荒漠区的扩大导致平原区荒漠面积减少。在山区，降水量增加和蒸发量减少等气候变化是导致高寒草甸草原面积呈波动增大的主要原因。这些说明平原区土地利用类型的变化与人类活动有密切关系，山区主要受气候变化的影响。

3.3 土地利用类型动态度分析

从表 4 可以看出，1973—1977 年期间，暖性灌草丛类面积增加最快(11.51%)，呈现净增加趋势，空间变化动态度最大(32.93%)；而平原荒漠面积减少速度最快(–5.39%)，与这期间的降水量增加一致。1977—1994 年期间，湿地面积以 3.98%的速度增加，空间动态度较高；平原区荒漠面积的减少速度最快(–2.46%)；冰川和山区荒漠变化较弱，空间变化动态度不大。在 1994—2004 年期间，平原区荒漠面积快速增加(8.89%)，空间变化动态度(11.22%)最大，水域面积减少最快(–3.17%)。2004—2014 年期间，冰川面积的减少速度最快(–3.59%)，耕地的空间动态度最快(12.76%)。总之，各类土地利用/覆盖类型动态度的时空变化各不相同。其中，耕地的时空动态度在整个研究期间一直处于净增加趋势，水域和冰川的时间动态度基本上呈现减少趋势。这说明研究区耕地和水资源之间的矛盾是该区社会经济发展中的关键问题之一。

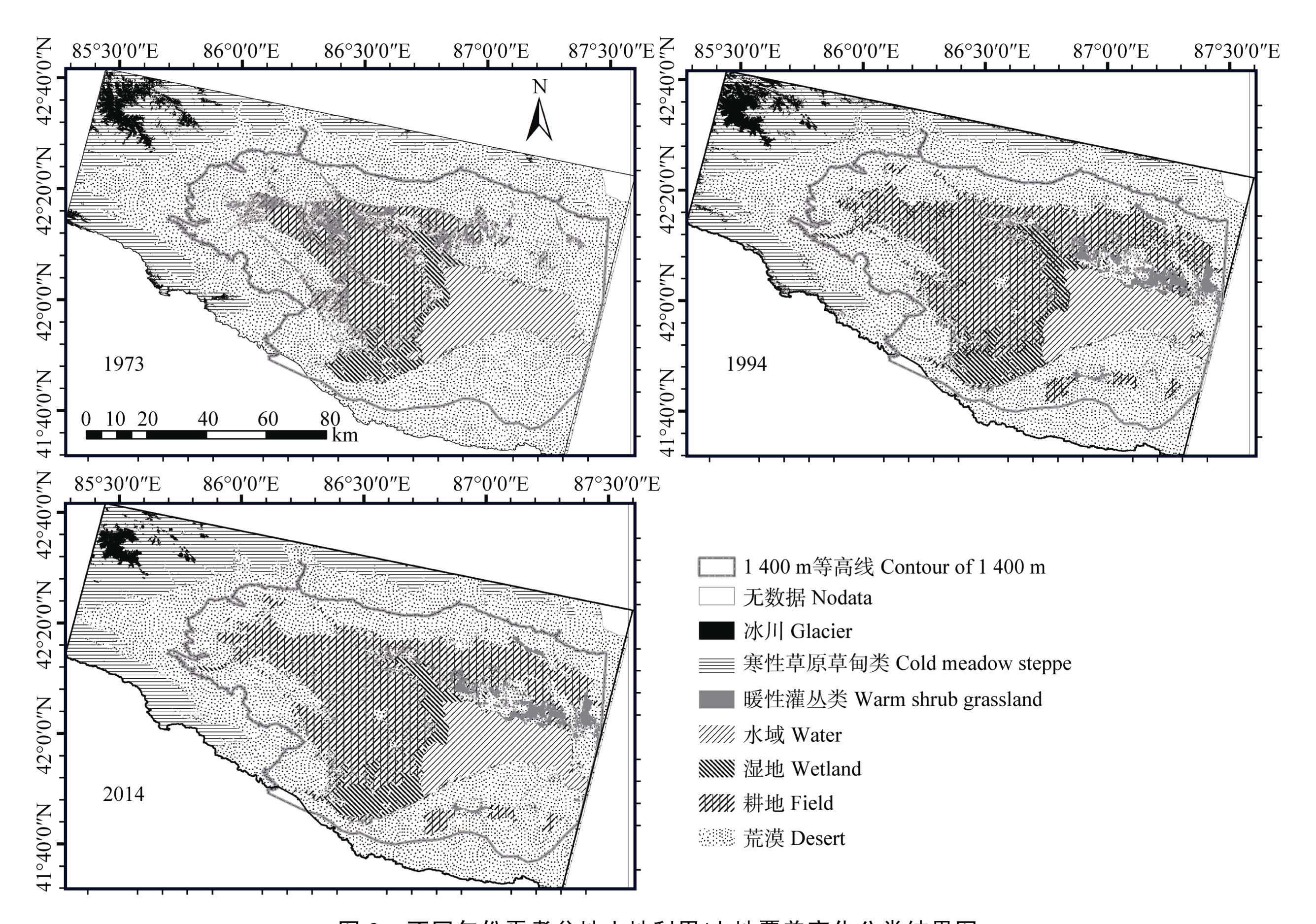


图 3　不同年份焉耆盆地土地利用/土地覆盖变化分类结果图

Fig. 3　Classification results of land use/cover changes (LUCC) in the Yanqi Basin in different years

表 2　1973—2014 年焉耆盆地平原区土地利用/覆盖变化转移矩阵

Table 2　Conversion matrix of land use/cover changes in plain area of the Yanqi Basin from 1973 to 2014　　%

年份 Year	土地利用/覆盖类型 Land use/cover type	水域 Water	湿地 Wetland	耕地 Cultivated land	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	荒漠 Desert
1973—1977	水域 Water	96.71	4.37	1.74	0.43	0.25
	湿地 Wetland	1.40	82.55	9.16	9.02	0.74
	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	0.22	3.97	2.45	42.52	5.72
	耕地 Cultivated land	0.56	6.08	81.67	37.24	1.77
	荒漠 Desert	1.11	3.00	4.98	10.77	91.51
1977—1994	水域 Water	92.46	3.07	0.69	0.40	0.26
	湿地 Wetland	3.98	54.21	5.15	2.23	0.41
	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	0.86	14.12	20.13	37.61	6.57
	耕地 Cultivated land	1.47	21.86	68.83	43.61	4.62
	荒漠 Desert	1.23	6.73	5.19	16.09	87.82
1994—2004	水域 Water	96.34	5.54	0.24	0.52	0.46
	湿地 Wetland	2.11	75.43	4.01	6.04	0.79
	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	0.42	2.98	17.51	46.13	21.55
	耕地 Cultivated land	0.50	14.92	75.80	40.28	8.11
	荒漠 Desert	0.61	1.08	2.38	6.60	68.71
2004—2014	水域 Water	88.49	0.02	0.04	0.07	0.05
	湿地 Wetland	3.48	80.09	3.07	1.52	0.79
	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	0.53	0.33	2.11	22.06	3.43
	耕地 Cultivated land	2.87	17.25	90.78	58.01	20.35
	荒漠 Desert	4.62	2.31	3.96	17.64	75.31

表 3 1973—2014 年焉耆盆地山区土地利用/覆盖变化转移矩阵
Table 3 Conversion matrix of land use/cover changes in mountain area of the Yanqi Basin from 1973 to 2014 %

年 Year	土地利用/覆盖类型 Land use/cover type	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	冰川 Glacier	荒漠 Desert
1973—1977	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	77.79	36.37	3.98
	冰川 Glacier	8.41	63.35	0.02
	荒漠 Desert	13.80	0.27	95.94
1977—1994	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	86.40	34.10	41.91
	冰川 Glacier	4.97	65.85	0.35
	荒漠 Desert	8.62	0.02	57.01
1994—2004	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	53.14	36.99	7.19
	冰川 Glacier	4.30	61.83	0.04
	荒漠 Desert	42.55	0.89	92.63
2004—2014	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	85.27	71.39	3.00
	冰川 Glacier	1.15	27.65	0.05
	荒漠 Desert	13.41	0.90	96.93

表 4 1973—2014 年焉耆盆地土地利用/覆盖类型变化动态度
Table 4 Dynamic degrees of land use/cover types changes of the Yanqi Basin from 1973 to 2014 %

年份 Year	动态度 Dynamic degree	水域 Water	湿地 Wetland	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	耕地 Cultivated land	平原荒漠 Plain desert	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	冰川 Glacier	山区荒漠 Mountain desert
1973—1994	年变化 Inter-annual change	1.33	−0.57	11.51	2.42	−5.39	1.28	0.20	−1.19
	空间变化 Spatial change	2.91	7.40	32.93	24.45	7.92	11.38	8.97	1.58
1977—1994	年变化 Inter-annual change	−0.26	3.98	2.76	2.07	−2.46	−0.34	−0.21	0.57
	空间变化 Spatial change	0.76	5.99	6.47	4.88	3.44	1.58	0.55	1.11
1994—2004	年变化 Inter-annual change	−3.17	−2.80	−0.81	1.98	8.89	0.75	−2.62	−2.37
	空间变化 Spatial change	5.69	6.49	1.42	3.84	11.22	9.75	6.09	2.86
2004—2014	年变化 Inter-annual change	−0.38	2.11	0.78	1.56	−2.93	−3.33	−3.59	0.61
	空间变化 Spatial change	1.41	3.73	6.68	12.76	4.26	4.40	4.03	1.49

3.4 土地利用类型对生态服务价值的影响及敏感性分析

从表 5、表 6、表 7 可看出, 1973—1977 年在平原区气体调节、气候调节、土壤形成、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料、娱乐休闲等生态服务功能价值下降, 其中耕地、水域、湿地的生态服务价值分别增加为 97.14×10^6 元·a^{-1}、76.93×10^6 元·a^{-1}、758.86×10^6 元·a^{-1}, 废物处理生态服务功能价值增加为 0.28×10^8 元。在山区所有生态服务功能提高, 生态服务价值也增加; 1977—1994 年

表 5 1973—2014 年焉耆盆地不同时期各生态系统类型的生态系统服务价值及其变化
Table 5 Ecosystem service values and changes in different years of each ecosystems of the Yanqi Basin from 1973 to 2014

项目 Item	年份 Year	耕地 Cultivated land	暖性灌草丛类 Warm shrub grassland	水域 Water	湿地 Wetland	平原区荒漠 Plain desert	冰川 Glacier	高寒草甸草原 Cold meadow steppe	山区荒漠 Mountain desert
生态系统服务价值 Ecosystem service value (10^6 Yuan·a^{-1})	1973	586.81	3.31	4 215.22	2 991.50	196.79	1.26	22.89	114.82
	1977	683.95	2.54	4 292.16	3 750.36	195.17	1.24	20.99	122.13
	1994	874.89	2.34	4 131.65	2 741.78	194.20	1.21	33.77	73.76
	2004	1 038.80	3.53	4 187.98	2931.11	166.26	1.19	21.29	121.99
	2014	1 434.77	3.81	3 735.89	3 624.68	138.59	1.14	20.58	147.72
生态系统服务价值年变化 Annual change of ecosystem service value (10^6 Yuan·a^{-1})	1973—1977	97.14	−0.77	76.93	758.86	−1.63	−0.02	−1.90	7.31
	1977—1994	190.94	−0.20	−160.50	−1 008.58	−0.96	−0.03	12.78	−48.37
	1994—2004	163.91	1.19	56.33	189.34	−27.94	−0.02	−12.48	48.23
	2004—2014	395.97	0.27	−452.09	693.56	−27.67	−0.05	−0.71	25.73

表 6　1973—2014 年焉耆盆地平原区不同时期生态系统服务价值及其变化
Table 6　Ecosystem service values and changes in different years of plain area in the Yanqi Basin from 1973 to 2014　10^8 Yuan

生态服务功能 Ecological service function	生态系统服务价值 Ecosystem service value (10^6 Yuan·a^{-1})					生态系统服务价值年变化 Annual change of ecosystem service value (10^6 Yuan·a^{-1})			
	1973	1977	1994	2004	2014	1973—1977	1977—1994	1994—2004	2004—2014
气体调节 Gas regulation	12.11	12.12	12.11	13.24	11.85	0.02	–0.01	1.13	–1.39
气候调节 Climate regulation	96.54	96.68	96.61	105.64	94.56	0.14	–0.07	9.03	–11.08
水源涵养 Water conservation	190.95	191.22	191.08	210.40	188.33	0.27	–0.14	19.32	–22.08
土壤形成 Soil formation	16.94	16.96	16.95	18.41	16.48	0.02	–0.01	1.46	–1.93
废物处理 Waste disposal	198.84	199.12	198.97	219.77	196.71	0.28	–0.15	20.79	–23.06
生物多样性保护 Biological diversity protection	31.80	31.85	31.83	32.96	29.50	0.04	–0.02	1.14	–3.46
食物生产 Food production	7.40	7.41	7.41	8.51	7.61	0.01	–0.01	1.10	–0.89
原材料 Raw materials	0.95	0.95	0.95	1.08	0.96	0.00	0.00	0.13	–0.11
娱乐休闲 Recreation and leisure	51.81	51.89	51.85	57.23	51.22	0.07	–0.04	5.38	–6.00

表 7　1973—2014 年焉耆盆地山区不同时期生态系统服务价值及其变化
Table 7　Ecosystem service values and changes in different years of mountain area in the Yanqi Basin from 1973 to 2014　10^8 Yuan

生态服务功能 Ecological service function	生态系统服务价值 Ecosystem service value (10^6 Yuan·a^{-1})					生态系统服务价值年变化 Annual change of ecosystem service value (10^6 Yuan·a^{-1})			
	1973	1977	1994	2004	2014	1973—1977	1977—1994	1994—2004	2004—2014
气体调节 Gas regulation	18.47	18.46	18.45	18.42	18.45	–0.01	–0.01	–0.02	0.03
气候调节 Climate regulation	147.28	147.21	147.12	146.93	147.15	–0.08	–0.08	–0.20	0.22
水源涵养 Water conservation	291.31	291.17	291.00	290.61	291.04	–0.15	–0.17	–0.39	0.43
土壤形成 Soil formation	25.84	25.83	25.81	25.78	25.82	–0.01	–0.01	–0.03	0.04
废物处理 Waste disposal	303.35	303.19	303.02	302.62	303.06	–0.16	–0.17	–0.40	0.45
生物多样性保护 Biological diversity protection	48.52	48.50	48.47	48.40	48.29	–0.02	–0.03	–0.06	–0.12
食物生产 Food production	11.30	11.29	11.28	11.27	11.29	–0.01	–0.01	–0.01	0.02
原材料 Raw materials	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00
娱乐休闲 Recreation and leisure	79.04	79.00	78.96	78.85	78.97	–0.04	–0.05	–0.10	0.12

在平原区所有生态服务功能呈减少趋势，减少最大是废物处理价值，减少 0.15×10^8 元。除了耕地以外，其他土地利用类型的生态服务价值也有所减少。在山区高寒草甸草原生态服务价值提高了 12.78×10^6 元·a^{-1}，冰川和荒漠的减少分别使其生态服务价值减少了 0.03×10^6 元·a^{-1} 和 48.37×10^6 元·a^{-1}，水源涵养和废物处理服务功能价值减少了 0.17×10^8 元。

1994—2004 年的生态服务功能平原区废物处理价值增加 20.79×10^8 元，山区减少 0.4×10^8 元，平原区水源涵养价值提高 19.32×10^8 元，平原区耕地、湿地、水域的生态服务价值分别提高 163.91×10^6 元·a^{-1}、189.34×10^6 元·a^{-1} 和 56.33×10^6 元·a^{-1}，冰川、高寒草甸草原等的生态服务价值都呈下降趋势，山区荒漠生态服务价值呈增加趋势，相反，平原区荒漠在减少。

2004—2014 年在平原区生态服务价值明显增加的是湿地地区，增加价值为 693.56×10^6 元·a^{-1}，水域生态服务价值有所减少，为 452.09×10^6 元·a^{-1}。在山区生态服务功能有明显增加的是废物处理价值、水源涵养价值和气候调节价值，分别为 0.45×10^8 元、0.43×10^8 元和 0.22×10^8 元，而在平原区以上生态服务功能价值均有所减少，分别减少了 23.06×10^8 元、22.08×10^8 元和 11.08×10^8 元，山区荒漠的生态服务价值增加了 25.73×10^6 元·a^{-1}。

各类土地利用类型的价值指数调整 50%后，利用公式(3)分别计算出了焉耆盆地的 1973 年、1977 年、1994 年、2004 年和 2014 年的生态服务价值敏感性指数(表 8)，可见耕地和湿地敏感性指数呈增加趋势，水域、平原区荒漠和山区荒漠的敏感性指数呈减少趋势。这表明耕地、湿地的生态服务价值系数变化幅度会对研究区生态服务总价值产生增大其幅动的作用，水域、平原区荒漠、山区荒漠生态系统价值系数变化幅度对研究区的生态服务总价值产生减小其幅动的作用。总的来说，不同年份不同土

表 8 1973—2014 年焉耆盆地不同土地利用类型生态服务价值敏感性指数变化
Table 8 Change of sensitivity coefficients of ecosystem services values for different land use types in the Yanqi Basin from 1973 to 2014 %

土地利用/覆盖类型 Land use/cover type	1973	1977	1994	2004	2014
耕地 Cultivated land	0.333	0.328	0.351	0.364	0.158
暖性灌草丛类 Shrub grassland	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
水域 Water	0.518	0.457	0.497	0.478	0.402
湿地 Wetland	0.368	0.414	0.340	0.346	0.400
平原区荒漠 Desert	0.024	0.021	0.024	0.020	0.015
冰川 Glacier	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
高寒草甸草原 Cold meadow steppe	0.003	0.002	0.004	0.003	0.002
山区荒漠 Desert	0.014	0.013	0.009	0.014	0.010

地利用类型生态服务价值对生态服务功能价值的敏感性指数远小于 1，说明研究区的生态服务价值对生态服务功能指数是缺乏弹性的，研究结果是可信的。谢高地等[23]确定的中国陆地生态系统单位面积生态服务价值系数适合研究区生态服务价值研究的量化。

3.5 气候变化和生态服务价值变化分析

根据 MK 突变点(图 2 和表 9)对研究区生态服务价值变化趋势进行分析：1973—1977 年在山区年平均降水量增加 29.4 mm，生态服务价值略有增加趋势，在平原区降水量增加 15.64 mm，生态服务价值也明显增加 8.54×10^8 元。1977—1994 年在山区和平原区年平均降水量增加 19 mm，同时年平均蒸发量也增加 404 mm，年平均蒸发量的增加比平均年降水量的增加更多，这导致整个研究区生态服务价值的减少(表 9)。1994—2004 年山区平均年降水量明显增加，1998 年降水量达到历史最大值 269.2 mm，而蒸发量呈减少趋势，生态服务价值增加 0.24×10^8 元；在平原区降水量增加和蒸发量减少不明显，但生态服务价值增加了 5.01×10^8 元。2004—2014 年山区降水量略有减少，蒸发量明显减少趋势，而生态服务价值也减少到 0.67×10^8 元，在平原区降水量略有增加，但蒸发量的增加大于降水量的增加，然而生态服务价值依然呈增加趋势，增加值为 6.37×10^8 元。综上所述，气候变化是影响山区生态服务价值的主要因素，平原区生态服务价值的变化是气候变化和人类活动共同作用的结果。其中，人类活动对平原区生态服务价值的影响日益强烈。

表 9 1973—2014 年焉耆盆地降水量、蒸发量、生态服务价值变化趋势
Table 9 Changes trends of precipitation, evaporation, ecosystem service value in the Yanqi Basin from 1974 to 2014

项目 Item	山区 Mountain area				平原区 Plain area			
	1970—1976	1977—1978	1979—2009	2010—2014	1970—1998	1999—2000	2001—2007	2008—2014
降水量 Precipitation (mm)	193.2	158.4	198.4	235.6	76.81	72.92	73.11	77.90
生态服务价值 Ecosystem service value (10^8 Yuan)	0.06	−0.32	0.24	0.70	8.54	−9.99	5.01	6.37
年份 Year	1980—1999	2000—2014	—	—	1980—2006	2007—2014	—	—
蒸发量 Evaporation (mm)	1 526.90	1 250.12	—	—	1 912.63	2 179.52	—	—

综上，焉耆盆地生态服务价值与功能随着降水量、蒸发量的变化而变化，但耕地的生态服务价值线性增加，在平原区 1973—2004 年气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料、娱乐休闲价值持续减少，而 2004—2014 年期间这些价值均有所增加，这主要是人类开荒耕地、还林、还耕、还有人工栽培芦苇等活动和气候变暖共同作用的结果；在山区 1973—2014 年期间生态服务价值呈持续减少趋势，山区主要受气候变化的影响，与 MK 突变点检测图所示一致，降水量增加、蒸发量减少趋势引起的环境演变与生态服务功能、价值的变化趋势一致，这说明气候变化和人类活动直接影响到生态服务价值与功能。

4 结论

受气候变化和人类活动的双重影响，不同尺度上的生态系统及其功能发生着深刻变化。因此，变化环境下的生态服务功能研究对生态环境与社会经济持续发展具有重要的科学意义和应用价值。本文

以 Landsat 遥感影像解译数据、DEM 数据和 1973—2014 年的气象要素数据等相结合, 对新疆焉耆盆地近 40 a 生态服务功能的变化及其驱动因素进行分析。研究结果表明:

1)土地利用/覆盖变化分析表明, 1973—1977 年水域大部分转变为湿地, 暖性灌草丛类大部分转变为耕地和荒漠; 1977—1994 年期间, 耕地的面积比例增加, 湿地、暖性灌草丛类的面积比例减少, 荒漠面积不断减少; 1994—2004 年期间, 在平原区各种土地利用类型中耕地面积增加速度最快; 在山区高寒草甸草原的增加面积最大; 在 2004—2014 年期间在平原区耕地、暖性灌草丛类、湿地的面积增加; 在山区高寒草甸草原的增加面积最大、速度最快, 这与山区气候变暖、降水量增加和蒸发量减少趋势同步, 在整个研究区生物量波动性增加, 生态环境在改善, 但水域、冰川减少对生态的持续健康发展不利。

2)土地利用/覆盖变化的动态度分析表明, 各类土地利用/覆盖类型动态度的时空变化各不相同。整个研究期间, 耕地的时空动态度一直处于净增加趋势, 水域和冰川的时间动态度基本上呈现减少趋势。研究区水资源和土地资源的矛盾在开发利用后比开发前更明显。

3)在焉耆盆地平原区各生态服务功能呈增加趋势。其中, 由于人类大面积开垦, 扩大绿洲面积使得耕地的生态服务价值呈线性增大。

4)焉耆盆地生态服务价值和功能随着降水量、蒸发量的变化而变化。在平原区 1973—2004 年气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料和娱乐休闲价值持续减少, 而 2004—2014 年期间这些价值均有所增加, 这主要是人类开荒耕地、还林、还耕、人工栽培芦苇等活动和气候变暖共同作用的结果。在山区 1973—2014 年期间生态服务价值处于减少趋势, 主要与气候变化引起的冰川面积缩小有关。

参考文献 References

[1] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N, et al. Land-use and land-cover change, implementation strategy[R]. IGBP Report No.48/HDP Report No.10. Stockholm: IGBP, 1999

[2] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应——以云南省永胜县为例[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 629–638
Peng J, Wang Y L, Zhang Y, et al. Land use change and its ecological effect in the ecotone of northwest of Yunnan Province, China: A case study of Yongsheng County[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 629–638

[3] 杨正勇, 唐克勇, 杨怀宇, 等. 上海地区池塘养殖生态服务价值的时空差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 217–226
Yang Z Y, Tang K Y, Yang H Y, et al. Spatial-temporal variations in eco-service values of pond aquaculture in Shanghai[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 217–226

[4] IPCC. Land Use, Land-Use Change and Forestry: A Special Report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

[5] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495–5504
Li H X, Liu G H, Fu B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5495–5504

[6] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1359–1370
Huang X Y, Li Y H, Feng J Y, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1359–1370

[7] 李明财, 刘德义, 郭军. 天津地区各季植被NDVI年际动态及其对气候因子的响应[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 979–983
Li M C, Liu D Y, Guo J. Interannual NDVI variability in different seasons and its response to climatic variables in Tianjin area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 979–983

[8] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553–558
Li X B. A review of the international researches on land use/land cover change[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(6): 553–558

[9] 索玉霞, 王正兴, 刘闯, 等. 中亚地区1982年至2002年植被指数与气温和降水的相关性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1422–1429
Suo Y X, Wang Z X, Liu C, et al. Relationship between NDVI and precipitation and temperature in Middle Asia during 1982–2002[J]. Resources Science, 2009, 21(8): 1422–1429

[10] 郭青霞, 陈焕伟, 周欣. 大同市南郊区土地利用生态服务价值空间分布及变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 188–192
Guo Q X, Chen H W, Zhou X, et al. Spatial distribution and changes of ecological service value of land use in the southern suburb of Datong City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 188–192

[11] Li X M, Li L H, Wang X X, et al. Reconstruction of hydrometeorological time series and its uncertainties for the Kaidu River Basin using multiple data sources[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 13(1/2): 45–62, doi: 10.1007/s00704-012-0771-2

[12] 买托合提·阿那依提, 玉素甫江·如素力, 麦麦提吐尔逊·艾

则孜, 等. 新疆开都河流域主要地貌形态特征研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1160–1166
Mattohti A, Yusufujiang R, Mamattursun E, et al. Study of the landform features in the Kaidu River basin of Xinjiang, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1160–1166

[13] 周成虎, 罗格平, 李策, 等. 博斯腾湖环境变化及其与焉耆盆地绿洲开发关系研究[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 14–23
Zhou C H, Luo G P, Li C, et al. Environmental change in Bosten lake and its relation with the oasis reclamation in Yanqi basin[J]. Geographical Research, 2001, 20(1): 14–23

[14] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 373–381
Li X S, Zhu Y M, Zhao L, et al. Ecosystem services value change in Qinglong County from dynamically adjusted value coefficients[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 373–381

[15] 玉素甫江·如素力. 新疆焉耆盆地二元水循环过程模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015
Yusufujiang R. GIS-SD based simulation of dualistic water cycle in the Yanqi basin, China[D]. Beijing: Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, 2015

[16] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245–259

[17] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Charles Griffin, 1975

[18] Sneyers R. On the statistical analysis of series of observations[R]. Geneva: WMO, 1990: 192–202

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010——2007 土地利用现状分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21010—2007 Current Land Use Classification[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007

[20] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 迪拉娜·尼加提, 等. 昆仑山北麓克里雅绿洲生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. 地理科学, 2012, 32(9): 1148–1154
Mamattursun A, Hamit Y, Dilana N, et al. The response of ecosystem services value to land use change in Keriya oasis, Northern Slope of Kulun Mountain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(9): 1148–1154

[21] 陈芳淼, 田亦陈, 袁超, 等. 基于供给生态服务价值的云南土地资源承载力评估方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1605–1613
Chen F M, Tian Y C, Yuan C, et al. Methods of land carrying capacity research based on ecological services supply value in Yunnan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(12): 1605–1613

[22] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3–15

[23] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189–196

[24] 王淑红, 谢自楚, 李巧媛. 近期东西天山冰川变化的对比研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 946–953
Wang S H, Xie Z C, Li Q Y. Comparison study of glacier variations in east and west Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 946–953

[25] 何毅, 杨太保, 田洪阵, 等. 近 23 年来北天山冰川面积变化对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 53–60
He Y, Yang T B, Tian H Z, et al. Response of glacier area variation to climate change in northern Tianshan Mountains in the past 23 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(3): 53–60